

Tutorial Erdgeschichte und Evolution 3: Erdzeitalter und Massenausterben

Erdzeitalter

Wir haben kennengelernt, mit welchen Methoden wir feststellen können, wie alt unsere Erde ist: Sie ist etwa 4,5 Mrd. Jahre alt. Einen solch langen Zeitraum unterteilt man in verschiedene Zeitabschnitte. So wie wir einen Kalender in Monate, Wochen und Tage einteilen, teilen auch Geologen und Paläontologen die Erde in verschiedene Zeitepochen auf.

Die Internationalen Kommission für Stratigraphie (ICS), eine ständige Kommission der International Union of Geological Sciences (IUGS) legt dabei die festgelegte globale Standardzeitskala fest, an der sich alle globalen Skalen orientieren. Die hierarchische Gliederung folgt dabei zwei parallel verwendeten und einander relativ ähnlichen Konzepten: der Geochronologie und der Chronostratigraphie.

Die Geochronologie, welches die Erdzeitalter (Abb. 1) mit absoluten Datierungsmethoden bestimmt, teilt die Erdgeschichte in folgende Hierarchieebenen auf:

Äon (englisch eon)

Ära (englisch era)

Periode (englisch period)

Epoche (englisch epoch)

Alter (englisch age)

Die Chronostratigraphie, welche die Erdzeitalter mit relativen Datierungsmethoden bestimmt, hat für die chronostratigraphischen Hierarchieebenen folgende Bezeichnungen.

Äonothem (englisch eonothem)

Ärathem (englisch erathem)

System (englisch system)

Serie (englisch series)

Stufe (englisch stage)

Äonothem /Äon	Ärahem /Ära	System/ Periode	Serie/ Epoche	Num- risches Alter (Mja)
PHANEROZOIKUM	MESOZOIKUM	PALÄOZOIKUM	QUARTÄR	HOLOZÄN 0,0117
			PLEISTOZÄN	2,58
			PLIOZÄN	5,333
			MIOZÄN	23,03
			OLIGOZÄN	33,9
			EOZÄN	56,0
			PALÄOZÄN	66,0
			KREIDE	100,5
			UNTERKREIDE	
			JURA	~ 145,0
PRÄKAMBRIUM	NEO- PROTERO- ZOIKUM	KRYOGENIUM	OBERJURA	163,5
			MITTELJURA	174,1
			UNTERJURA	201,3
			TRIAS	~ 237
			MITTELTRIAS	247,2
			UNTERTRIAS	252,17
			LOPINGIUM	259,8
			GUADALUPIUM	272,3
			CISARALIUM	298,9
			KARBON	323,2
PALÄOZOIKUM	DEVON	SILUR	MISSISSIPIUM	358,9
			OBERDEVON	382,7
			MITTELDEVON	393,3
			UNTERDEVON	
			ORDOVI- ZIUM	419,2
			PRIDOLI	423,0
			LUDLOW	427,4
			WENLOCK	433,4
			LLANDOVERY	443,8
			KAMBRIUM	458,4
HADAIKUM	TONIUM	TERRENEUVIUM	MITTELORDOVIZIUM	470,0
			UNTERORDOVIZIUM	485,4
			FURONGIUM	~ 497
			SERIE 3	~ 509
			SERIE 2	~ 521
Auslassung von Proterozoikum (Teile) und Archaikum	EDIACARIUM	TERRENEUVIUM	TERRENEUVIUM	541
				635
				720
				1000
HADAIKUM				~ 4600

Abb.1: Erdzeitalter

Die einzelnen Namen der Intervalle sind in beiden Konzepten identisch. Beide Konzepte sind eng miteinander verknüpft, denn absolute (numerische) Alters- bzw. Zeitangaben können nur aus geologisch überliefertem Material gewonnen werden, im Regelfall durch radiometrische Datierung. Eine strikte Trennung von Geochronologie und Chronostratigraphie wird in der Praxis daher nur selten durchgehalten. Ich werde mich in meinen Beiträgen auf die Bezeichnungen der Geochronologie stützen.

Die Erdgeschichte wird in vier Äonen geteilt:

Das Hadaikum oder „Äon der Erdentstehung“, welches vor etwa 4,6 Mrd. Jahren begann und etwa 600 Mio. Jahre dauerte, ist das erste der Äonen. Derzeit gibt es keine verbindliche Unterteilung des Hadaikums. Informationen über das Alter der Erde stammen nicht von den Gesteinen der Erde selbst, sondern von speziellen Meteoriten, den Chondriten, von denen angenommen wird, dass sie im gleichen Zeitraum wie die Erde entstanden sind und sich seitdem – im Gegensatz zur Erde – nicht mehr verändert haben. Die Altersbestimmung erfolgt mittels der Isotopengeochemie. Mit ihr wurde ein Alter von rund 4568 Millionen Jahren ermittelt.

Das zweite Äon ist das Archaikum, mit einer Zeitspanne von 4 – 2,5 Mrd. Jahren. Das Archaikum wird in vier Ären unterteilt: Eoarchaikum, Paläoarchaikum, Mesoarchaikum und Neoarchaikum. Eine weitere Unterteilung in Perioden und Epochen findet nicht statt.

Das dritte Äon ist das Proterozoikum, auch das „Äon der Einzeller“ genannt. Es begann vor 2,5 Mrd. Jahren und endete vor etwa 542 Mio. Jahren. Es wird in drei Ären unterteilt: Paläo-, Meso- und Neoproterozoikum. Diese drei Ären werden wiederum in 10 Perioden unterteilt. Besondere Erwähnung soll hier vor allem die letzte Periode finden, nämlich das Ediacarium. Es begann vor etwa 635 Millionen Jahren und endete vor rund 542 Mio. Jahren. In dieser Periode entwickelten sich die ersten vielzelligen Tiere. Viele Lebewesen der Ediacara-Fauna ähneln kaum oder gar nicht den heute lebenden Tieren.

Diese drei Äonen werden auch gerne als Präkambrium zusammengefasst.

Das vierte und wohl bekannteste Äon ist das Phanerozoikum als „Äon sichtbarer Fossilien“, da lange Zeit nur aus diesem Äon Fossilien bekannt waren. Es begann vor ca. 542 Mio. Jahren und dauert bis heute an. Unterteilt ist das Phanerozoikum in drei Ären: Paläozoikum, Mesozoikum und Känozoikum. Alle drei Ären haben auch einen deutschen Namen: Erdaltertum, Erdmittelalter und Erdneuzeit.

Hier erfolgt eine Unterteilung in insgesamt 12 Perioden:

Das Paläozoikum hat die Perioden: Kambrium, Ordovizium, Silur, Devon, Karbon und Perm.

Das Mesozoikum wird in die Perioden Trias, Jura und Kreide unterteilt. Das ist das berühmte Zeitalter der Dinosaurier.

Das Känozoikum wird unterteilt in die Perioden Paläogen, Neogen und Quartär. Paläogen und Neogen wurden früher als Tertiär zusammengefasst.

Hier werden die einzelnen Perioden nochmals in Epochen und diese in Alter untergliedert. Diese alle aufzuzählen würde aber zu weit führen. Aber als Beispiel: die Kreidezeit teilt sich in die Epochen Obere und Untere Kreidezeit, die beide in jeweils sechs Alter aufgeteilt werden.

Die Grenzen der Einheiten bzw. Intervalle des Phanerozoikums sind primär meist anhand des Erscheinens oder Verschwindens bestimmter Tierarten im Fossilbericht (ein sogenanntes Bioevent) definiert. Es handelt sich dabei stets um Überreste von Meeresorganismen, weil zum einen Meeressedimente, speziell Schelf-sedimente, in der geologischen Überlieferung wesentlich häufiger sind als festländische Sedimente, und zum anderen, weil Schelfsedimente im Schnitt deutlich fossilreicher sind als festländische Sedimente. Also das Interessante: das Mesozoikum wird paläontologisch nicht primär durch die Dinosaurier definiert, sondern, was in den Ozeanen herumschwamm.

Definiert ist jeweils immer nur die Basis, die Untergrenze, einer Einheit, und die Obergrenze ist identisch mit der Basis der nächstfolgenden. Neben den primären Markern sind die Einheiten zusätzlich durch sekundäre Marker definiert, die das Auffinden der Einheitengrenze in Sedimenten, die den Primärmarker fazies-bedingt nicht enthalten, ermöglichen soll. Unter Fazies im weitesten Sinn werden alle Eigenschaften eines Gesteins verstanden, die aus seiner geologischen Geschichte herrühren. Es können rein beschreibende Merkmale sein (Farbe, Mineralbestand, Fossilien) oder solche, die typisch für die Entstehung (Magmatismus, Sedimentation) oder die nachträgliche Veränderung (Metamorphose, Verwitterung) eines Gesteinskörpers sind. Neben Fossilien dienen also auch geochemische und/oder magnetostratigraphische Anomalien als Marker.

Die Zusammenfassung der Alter zu Perioden und dieser wiederum zu Ären erfolgt aufgrund gemeinsamer Merkmale der Fossilüberlieferung in den Sedimentgesteinen dieser Einheiten. Die Grenzen höherrangiger Einheiten fallen daher oft mit bedeutenden Massenaussterben zusammen, in deren Folge sich die Zusammensetzung der fossilen Faunen deutlich und vor allem auf höheren taxonomischen Niveaus ändert. Die geologische Zeitskala bildet damit auch die Evolutionsgeschichte ab.

Die Einteilung der drei ersten Äonen und damit des weitaus längsten Abschnittes der Erdgeschichte kann, mit Ausnahme des Ediacariums, hingegen nicht auf Grundlage von Fossilien erfolgen, weil es in diesen Gesteinen keine oder wenigstens keine brauchbaren Fossilien gibt. Stattdessen wird eine „künstliche“ Gliederung verwendet, die auf Mittelwerten radiometrisch ermittelter Altersdaten tektonischer Ruhephasen

fußt. Diese auf volle 50 oder 100 Millionen Jahre gerundeten Werte werden Global Standard Stratigraphic Age (GSSA) genannt.

Für die älteren Einheiten des Präkambriums wird die geologische Überlieferung mit zunehmendem Alter immer schlechter. Die seit Milliarden Jahren permanent ablaufende exogene und endogene Aufarbeitung („Recycling“) der Erdkruste, also der Gesteinskreislauf hat einen Großteil dieser frühen Gesteine zerstört.

Massenaussterben

Im Phanerozoikum fanden fünf große Massenaussterben statt: Am Ende des Ordoviziums, am Ende des Devons, am Ende des Perms, am Ende der Trias und am Ende der Kreide.

Im Verlaufe der Erdgeschichte sind über 99% aller Arten ausgestorben. Doch die Aussterbeereignisse liefen keineswegs gleichmäßig ab. Einige von ihnen waren regional bedingt, wie das Aussterben der Megafauna zum Ende der letzten Eiszeit vor 11.000 Jahren, andere Aussterbeereignisse waren global, wie die 5 erwähnten globalen Massenaussterbeereignisse. Diese hatten auch globale Ursachen. Das wohl bekannteste Massenaussterben fand vor ca. 66. Mio. Jahren zum Ende der Kreidezeit statt: hier verschwanden die Dinosaurier, die Flugsaurier, die verschiedenen Meeresreptilien, die Ammoniten und viele andere Tiergruppen. Ursache hierfür war ein kosmischer Einschlag eines Asteroiden. Indizien dafür, dass es ein kosmischer Einschlag war zeigt sich dadurch, dass in den Gesteinen, die den Übergang von der Kreide zum Paläogen markieren sich erhöhte Konzentrationen des Metalls Iridium befinden. Iridium kommt in der Erdkruste relativ selten vor, wohl aber in Asteroiden. Außerdem ist auch der Einschlagskrater bekannt, der Chicxulub Krater auf der Yucatan-Halbinsel in Mexiko, der ein Durchmesser von etwa 180 km hat. Der Einschlag des kosmischen Gesteins, der etwa 10 km groß war und die Sprengkraft von 1 Mrd. Atombomben hatte führte zu enormen klimatischen und damit ökologischen Veränderungen und löschte etwa 70% der damaligen Arten aus.

Viel verheerender war jedoch das Massensterben an der Perm/Trias-Grenze vor etwa 250. Mio. Jahren, bei der etwa 95% aller im Meer lebenden Organismen ausgestorben ist. Als Hauptfaktor für den Zusammenbruch fast aller Ökosysteme gilt allgemein der großräumige Flutbasalt-Ausstoß des Sibirischen Trapps, dessen Aktivitätszyklen über mehrere Hunderttausend Jahre eine Fläche von 7 Millionen Quadratkilometern mit magmatischen Gesteinen bedeckten und die eine Reihe schwerwiegender Folgeschäden verursachten. Die dafür verantwortlichen Vulkanausbrüche bilden eines der größten weltweit bekannten vulkanischen Ereignisse der Erdgeschichte. Der Megavulkanismus emittierte dabei erhebliche Mengen an Kohlenstoffdioxid, Fluor, Chlorwasserstoff und Schwefeldioxid, das als Schwefelsäure im Regenwasser gleichermaßen ozeanische und kontinentale Biotope schädigte. Aufgrund der hohen CO₂-Ausgasungen des Trapps stieg die globale Temperatur innerhalb einer

geologisch sehr kurzen Zeitspanne um 5 °C. Diese signifikante Erwärmung leitete unmittelbar zur Kernphase des Massenaussterbens über.

Paläoklimatologische Analysen der Sauerstoff-Isotope dokumentieren eine Erwärmung der oberen Meeresschichten bis zum Ende des Ereignisses um mindestens 8 °C (Joachimski et al. 2012). Mit der Bildung und Ausbreitung anoxischer Zonen und dem rapiden Absacken des pH-Werts begann das Massensterben in den Ozeanen. Die Versauerung der Meere gilt als eine der Hauptursachen für das weitgehende Verschwinden mariner Lebensformen (Clarkson et al. 2015). Verstärkt wurde diese Entwicklung durch die unter dem Treibhausklima sehr rasch verlaufenden Erosionsprozesse, die zu einer Überdüngung (Eutrophierung) der Ozeane mit festländischen Verwitterungsprodukten wie zum Beispiel Phosphate führten (Jurikova et al. 2020).

Die drei anderen globalen Massensterben sind weniger gut erforscht. Das Massensterben am Ende des Ordoviziums korreliert mit der Veränderung des Klimas. Eine erste Phase des Aussterbens begann mit oberordovizischen Vereisung und eine zweite Phase des Aussterbens endete mit der Vereisung. In diesem Massenaussterbe-Ereignis waren viele Muscheln, Bryozoen und Korallen betroffen. Es gab jedoch keine starken ökologischen Auswirkungen, nicht zuletzt, weil es nur sehr wenig Leben an Land gab.

Im Späten Devon kam es zu einem weiteren Massenaussterben, hervorgerufen durch Änderungen in der Chemie der Ozeane.

50 Mio. Jahre nach dem Massenausterben im Perm kam es zu einem erneuten Massenaussterben am Ende der Troas, vor etwa 201 Mio. Jahren. Es gab riesige vulkanische Eruptionen, als der Superkontinent Pangäa auseinanderbrach und der atlantische Ozean begann sich zu bilden. Elf Mio. km² Basaltlava brauch innerhalb einer halben Mio. Jahren aus und bildete die sog. Zentralatlantische Magmaprovinz, welche vom heutigen Frankreich bis nach Brasilien reichte. Kohlenstoffisotope deuten auf große Veränderungen in der Produktivität der Ozeane hin, und es gab bedeutende Aussterbeereignisse in den Ozeanen. An Land starben einige Gruppen der Reptilien und Pflanzen aus. Die großen Lavafelder und Vulkanausbrüche setzten, ähnlich dem Aussterbeereignis im Perm, große Mengen an CO₂ und Schwefelgasen frei, sie waren aber in ihrer Menge und Intensität nicht so gravierend.

So gravierend die Massenaussterbereignisse waren, nach Ihnen wurden ökologische Nischen frei und neue Arten übernahmen den Platz der Alten. Wären die Dinosaurier nicht ausgestorben, hätten die Säugetiere und damit auch wir keine Möglichkeit gehabt die dominierende Rolle zu spielen, die wir ihnen zuschreiben. Basierend auf den Faunenwechsel unterschieden Paläontologen drei Faunen, also Tierwelten: die kambrische Fauna, die paläozoische Fauna und die moderne Fauna. Die Faunen überschneiden sich zeitlich und die Namen dienen nur der Übersichtlichkeit. Aber sie spiegeln die Tatsache wider, dass verschiedene Organismengruppen eine sehr unterschiedliche Geschichte hatten. Diese Fauneneinteilung wurde anhand von

Meeresorganismen durch Jack Sepkosi vorgenommen, um zu sehen, ob es Untergruppen von Organismen gab, die ähnliche Diversitätsmuster aufweisen.

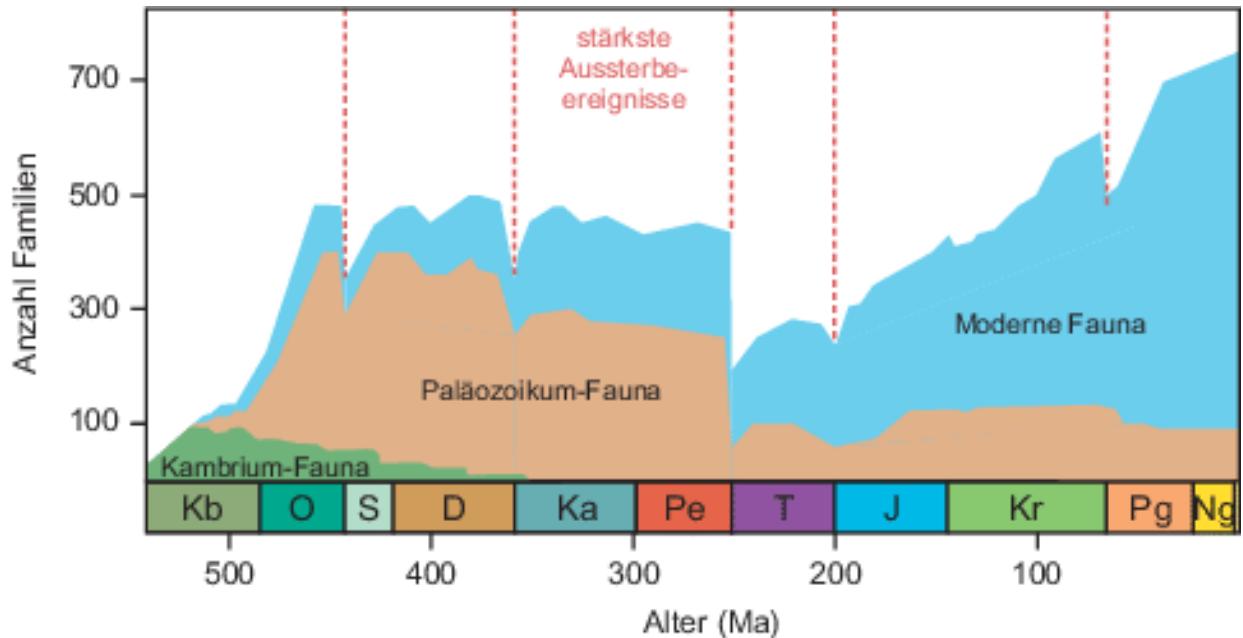


Abb. 2: die kambrische Fauna, die paläozoische Fauna und die moderne Fauna

Epilog

Ich möchte diesen Beitrag mit einem persönlichen Statement abschließen:

Aktuell stehen wir vor einem sechsten globalen Massenaussterben. Der Verursacher sind nicht kosmische Einschläge oder Vulkanausbrüche, sondern die zunehmend destruktive und irrationale Wirtschaftsweise unserer Spezies, die auf kurzzeitig gedachten Profit für einige wenige ausgerichtet ist. Klimawandel, Überfischung, Plastikmüll, Vernichtung der Regenwälder und anderer Lebensräume, die Verbreitung von Pestiziden und anderen Giftstoffen, die militärische Aufrüstung und Zerstörung unserer Lebensgrundlagen durch Kriege und ein unzureichendes globales Gesundheits- und Versorgungssystem sind Auswirkungen dieses Wirtschaftens. Profiteure hiervon nur einige wenige unintelligente Designer unserer Spezies und es wirkt schon absurd, dass das Schicksal von 7,5 Mrd. Homo sapiens und der anderen ca. 20- 100 Mio. Tier- und Pflanzenarten dieses Planeten davon abhängig ist.

Sicher: die Welt wird nicht untergehen. Das Leben als Ganzes wird wahrscheinlich auch dieses Massenaussterben überleben. Neue Lebewesen werden die alten ökologischen Nischen besetzen und das Leben wird sich weiterentwickeln. Die Frage ist, ob wir zu den überlebenden gehören werden oder dasselbe Schicksal erleiden werden wie die Dinosaurier.

Gleichzeitig hat dieses Massenaussterben aber auch ein Licht am Horizont, einen Hoffnungsschimmer. Meteoriteneinschläge oder den Ausbruch von Supervulkanen können wir nur schwer verhindern. Wenn aber unsere Art des Wirtschaftens die Ursache für das derzeitige Massenaussterben ist, so liegt es auch an uns diese Art des Wirtschaftens zu verändern. Unsere Art hat sehr kluge Köpfe mit sehr klugen Ideen hervorgebracht allen Menschen ein gesichertes Auskommen zu geben, ohne gleich die Lebensgrundlagen anderer Arten oder unserer Nachkommen zu vernichten. Diese Ideen müssen sich durchsetzen – zur Not gegen den Willen der wenigen, die vom derzeitigen System profitieren. Denkt darüber nach!

Literatur:

Allgemeine Lehrbücher zu den Erdzeitaltern:

- Benton, M. et al. (2020): Cowen's History of Life, Sixth Edition. Wiley Blackwell, Kapitel 2 (S. 19 – 22)
- Futuyma, D. J. (2007): Evolution. Spektrum Akademischer Verlag, Kapitel 4, S. 68-70
- Kutschera, U. (2006): Evolutionsbiologie, 2. Auflage. UTB, Kapitel 4, S. 85-88
- Oschmann, W. (2016): Evolution der Erde. Utb, Kapitel 1.2 („Zeit“); S. 16-20
- Ochmann, W. (2018): Leben der Vorzeit. Utb, Kapitel 7 („Stratigraphie“), S. 85-92
- Prothero, D. (2017): Evolution – What the Fossils say and why it matters. Second edition. New York: Columbia University Press, insbesondere Kapitel 3 „The Fossil Record“
- Prothero, D. (2021): The Evolving Earth. Oxford University Press, Kapitel 3 („Dating Rocks“) und Kapitel 4 („Stratigraphy“)
- Prothero, D. & Dott, (2004): Evolution of the Earth, Seventh edition. McGrawHill, Kapitel 4 und 5
- Storch, V., Welsch, U., Wink, M. (2001): Evolutionsbiologie, Kapitel 1.2.2.1 Methoden der Altersbestimmung, S. 34-35

Zitierte Spezialliteratur

- Clarkson, M. O. et al.(2015): Ocean acidification and the Permo-Triassic mass extinction. Science 348 (6231): 229–232.

International Commission on Stratigraphy <https://stratigraphy.org/>

Joachimski, M. et al. (2012): Climate warming in the latest Permian and the Permian–Triassic mass extinction. *Geology*. 40 (3): 195–198.

Jurikova, H. et al. (2020): Permian–Triassic mass extinction pulses driven by major marine carbon cycle perturbations. *Nature Geoscience*. 13 (11): S. 745–750.

<http://www.si-journal.de/index2.php?artikel=jg23/heft2/sij232-3.html>

Anhang: Lebensbilder der Erdgeschichte



Abb. 2: Hadaikum

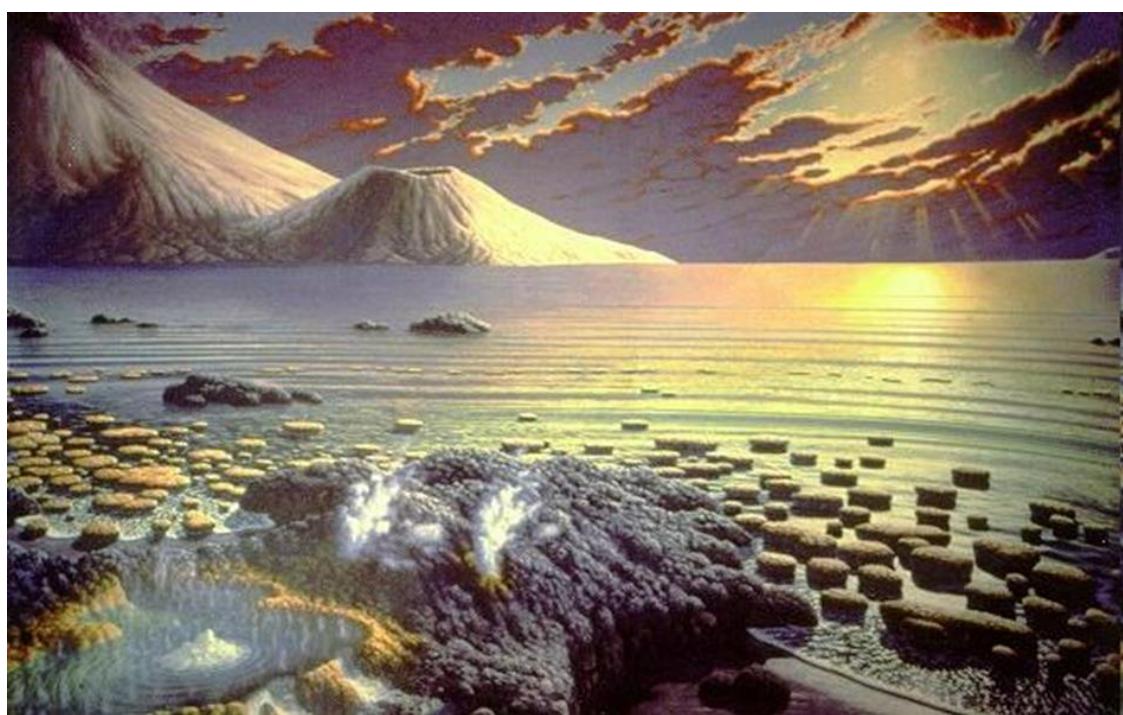


Abb. 3: Archaikum



Abb. 4: Ediacarium als letzte Periode des Proterozoikums



Abb. 5 Kambrium

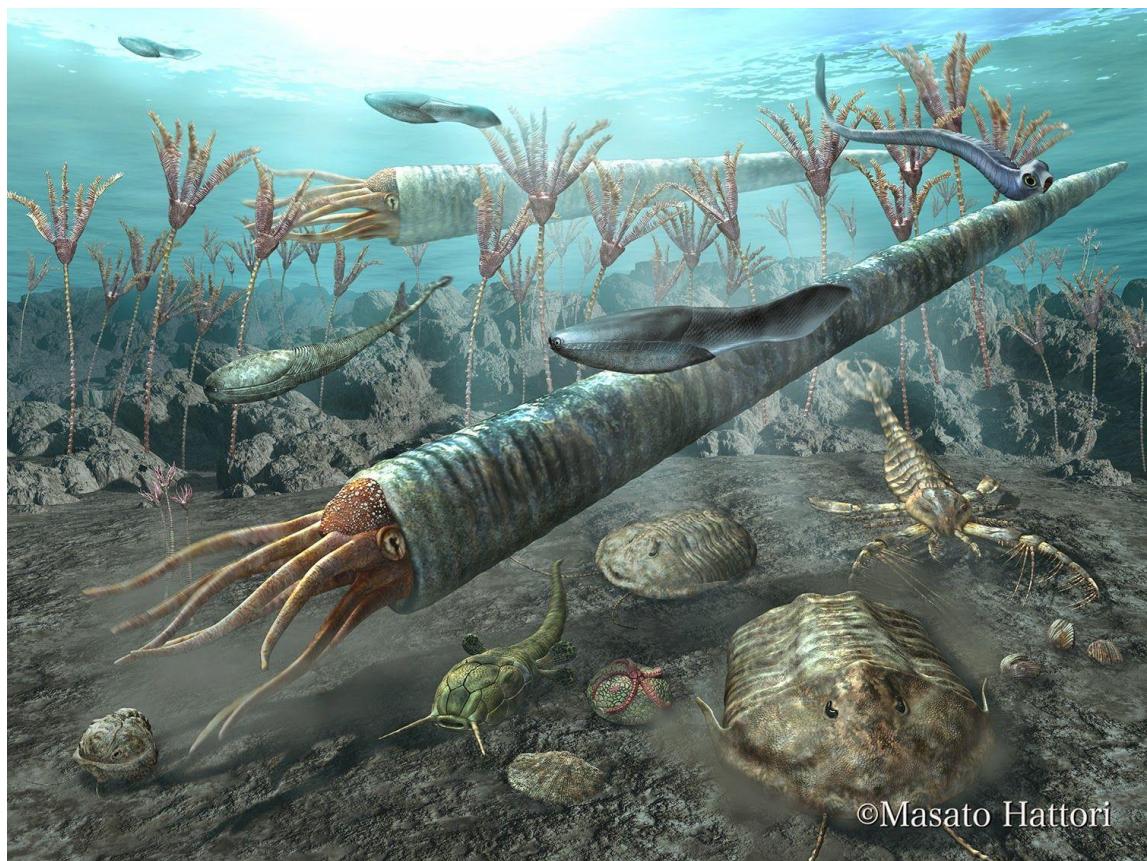


Abb. 6: Ordovizium



Abb. 7: Silur



Abb. 8: Devon



Abb. 9: Karbon



Abb. 10: Perm



Abb. 11: Trias

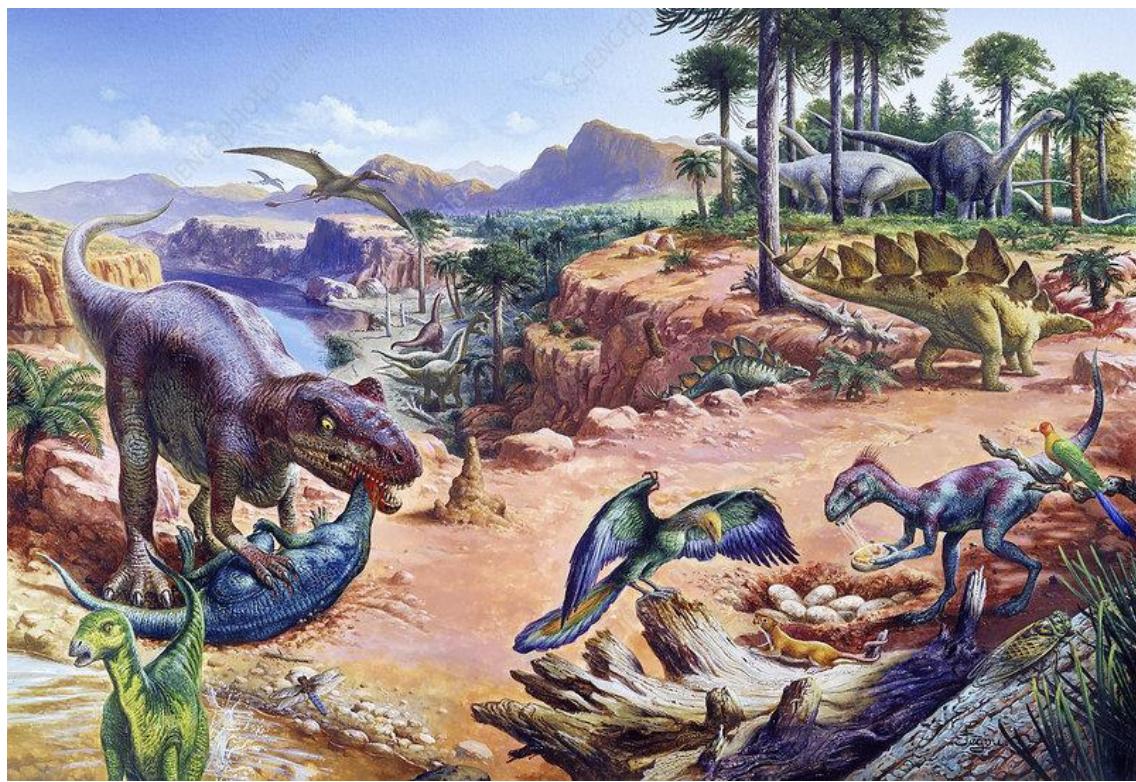


Abb. 12: Jura

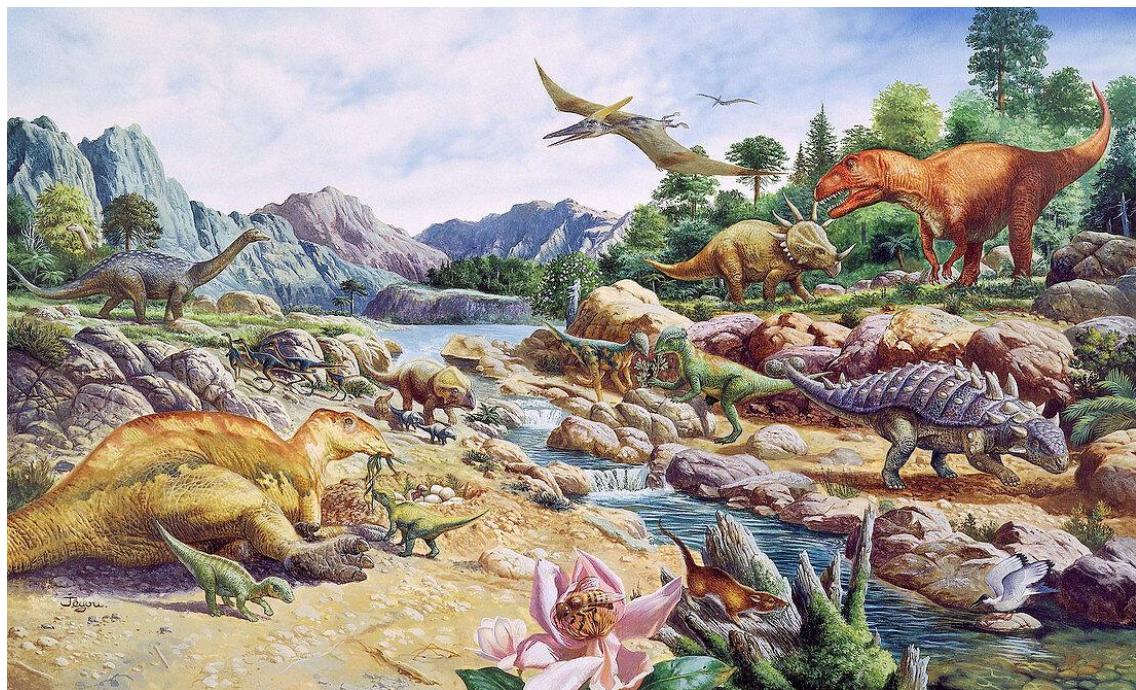


Abb. 13 Kreide

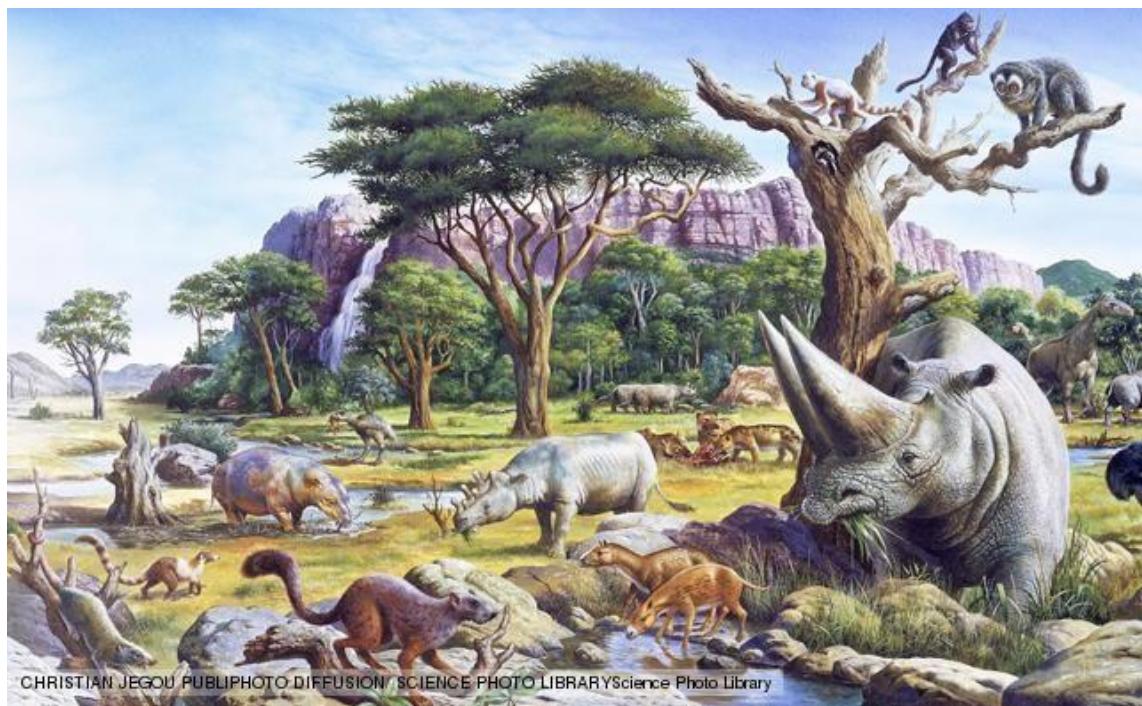


Abb. 14: Paleogen



Abb. 15: Neogen



Abb. 16: Quartär